

# 基于模糊数学综合评价法的喀斯特生态系统健康评价<sup>\*</sup>

曹欢<sup>1</sup>, 苏维词<sup>2,3</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境学院, 贵阳 550003; 2. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵阳 550001; 3. 重庆师范大学 地理科学学院, 重庆 400047)

**摘 要:** 通过定性和定量分析建立了一套相对完整的评价指标体系, 采用因子分析法进一步筛选评价指标, 应用熵权法赋予指标权重, 采用模糊数学方法构建评价模型, 并对毕节地区喀斯特生态系统健康状态进行了实例研究。结果表明, 毕节地区喀斯特生态系统在结构功能方面属于亚健康, 可持续利用能力方面属于不健康状态, 动态变化方面属于健康状态。以桂林、昆明作为参比地区进行了对比评价, 得出3个喀斯特生态系统整体健康状况排序为: 桂林> 昆明> 毕节地区。通过此评价, 明确了毕节地区喀斯特生态系统健康的状况及其影响因子, 了解其与其它2个喀斯特地区的健康差距, 为喀斯特生态系统的保护提供科学依据。

**关键词:** 喀斯特生态系统健康; 评价指标; 评价模型; 毕节地区

中图分类号: P642.25; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)03-0148-07

## Studies on Ecosystem Health Evaluation Based on Fuzzy Mathematics Method in Karst Areas

CAO Huan<sup>1</sup>, SU Weici<sup>2,3</sup>

(1. Resources and Environment College of Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy, Guiyang 550001, China; 3. Geography Science Institute, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract:** The evaluation method of karst ecosystem health was emphatically discussed. By qualitative and quantitative analysis, a set of relatively integrated evaluation indexes system was brought forth. Moreover, entropy was employed to give indexes weight, and fuzzy mathematics was utilized to establish the evaluation model. Then the situation of karst ecosystem health in Bijie area was studied as a case. The results indicated that the Bijie area in the karst ecosystem health functions belong to the structure of the sub-health, sustainable use of capacity belong to the unhealthy state, dynamic change belong to the healthy state. Subsequently, by contrastive evaluation with Guilin, Kunming as the reference karst areas, the integrated conditions of karst ecosystem health of these four areas followed as the sequence: Guilin> Kunming> Bijie area. Consequently, the evaluation could made clear the condition and influencing factors of karst ecosystem health of Bijie area. The health gap between Bijie area and the other three karst areas provided a scientific basis for programming and protecting of karst ecology of Bijie area.

**Key words:** karst ecosystem health; evaluation index; evaluation model; Bijie area

随着社会的发展以及人们环保观念的增强, 对生态系统健康的研究也越来越深入<sup>[1-10]</sup>。除了涉及生

态系统健康的概念评价指数及方法外, 还对各类型生态系统(如森林、湿地、农田、草地、湖泊、城市生态系

\* 收稿日期: 2008-10-20

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划专题(2006BAC01A09-5); 贵州省科技攻关计划(黔科合S字[2007]1018); 贵州省重大科技专项(黔科重大合[2006]6014); 贵州省发改委高新技术产业化项目

作者简介: 曹欢(1983-), 女, 天津市人, 硕士研究生, 主要从事环境科学方面的研究。E-mail: caohuan-531@163.com

通信作者: 苏维词(1965-), 男, 湖南人, 研究员, 主要研究方向为生态环境与可持续发展。E-mail: suweici@sina.com

统等) 健康也有专门性研究<sup>[11-16]</sup>。而针对喀斯特生态系统健康的研究, 尤其是对喀斯特生态系统健康的实际案例评价和对比研究较少。本文结合喀斯特地区的一些具体特点初步建立了一套相对完整的评价指标体系和评价方法, 并应用到实际案例中, 以便为喀斯特生态系统保护与健康发展提供科学依据。

1 喀斯特生态系统健康概念和评价方法

1.1 喀斯特生态系统健康概念

对于生态系统健康的概念, 目前比较公认的是指生态系统在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力, 通过活力、组织结构和恢复力等 3 个特征进行定义<sup>[1-2, 17-18]</sup>。但这一概念是针对一般的生态系统而言, 而喀斯特生态系统是一种具有特殊物质、能量、结构和功能的生态系统<sup>[19]</sup>, 具有生态敏感度高, 环境容量低, 抗干扰能力弱, 稳定性差, 一旦受到干扰生态很难恢复等特点。

1.2 构建评价指标体系

1.2.1 评价方法 目前的生态系统健康评价方法有物种指示法、生态风险评价法、综合指标评价法等, 对各种生态系统健康评价应包含的指标并没有达成统一的共识, 很多都是从生态系统的压力, 状态, 响应等方向建立评价指标体系<sup>[20]</sup>, 缺乏从生态系统的结构、活力和功能的完整性、生态系统的可持续利用能力、生态系统的动态变化等不同层面构建生态系统健康评价的指标体系。本文根据喀斯特生态系统健康的内涵和人类活动对生态系统的影响, 分析喀斯特生态系统的特点, 从结构功能、可持续利用能力和动态变化等方面出发, 参照国内外许多著名的学者, 如 Costanza、Rapport、肖风劲、李文龙、鲁绍伟等学者提出的健康评价指标, 结合研究资料, 初步确立适合喀斯特生态系统健康评价的指标体系, 使指标能较准确、较全面地反映喀斯特生态系统健康状况(表 1)。

表 1 2003- 2006 年毕节地区喀斯特生态系统健康评价指标体系

	序号	指标	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
活力	01	自然保护区覆盖率/ %	1.25	1.54	1.95	2.12
	02	森林覆盖率/ %	33.92	32.52	33.92	34.84
	03	水资源总量/ 亿 m <sup>3</sup>	86.606	99.598	122.714	74.503
	04	植物种类/ 种	3011	3011	3011	3011
结构	05	园地面积比率/ %	0.29	0.2	0.35	0.27
	06	草地面积比率/ %	23.28	20.6	26.67	24.61
	07	耕地面积比率/ %	13.54	13.58	13.6	13.58
	08	建设用地面积比率/ %	3.14	3.08	3.02	2.96
	09	水域面积比率/ %	0.93	0.7	1.13	0.95
	10	喀斯特土地面积占全区土地面积比率/ %	73.3	73.3	73.3	73.3
	11	山地、丘陵占总面积/ %	93	93	93	93
	12	年日照时间/ h	1341.12	1339.35	1084.8	1345.24
功能	13	全区年平均温度/ °C	13.39	13.38	13.25	13.34
功能	14	粮食单产/ ( kg · m <sup>-2</sup> )	0.33	0.38	0.39	0.39
	15	人口密度/ ( 人 · km <sup>-2</sup> )	262.85	266	273.47	275.88
	16	城镇化率/ %	14.87	15.43	16.14	17.85
	17	年降水量/ 亿 m <sup>3</sup>	217.765	237.165	229.78	218.381
	18	人均占有粮食/ kg	288.2	334.04	340.08	342.94
	19	农民人均住房面积/ m <sup>2</sup>	16.36	17.91	19.46	21.01
	20	人均耕地面积( m <sup>2</sup> / 人 )	510.41	511.08	502.51	498.97
	21	农业人口占总人口比重/ %	93.06	92.87	92.89	92.8
	22	万人占有公路/ km	11.03	14.78	10.02	17.15
	23	人均占有水资源量( m <sup>3</sup> / 人 )	1654.34	1393	1020	1020
可持续利用能力	24	工业固废综合利用率/ %	37.01	36.71	40	36.11
	25	工业废水排放达标率/ %	21.61	32.07	35.13	38.2
	26	工业废气处理率/ %	59.84	69.92	80	90.08
	27	植树造林面积/ km <sup>2</sup>	815.59	772.41	665.67	754.65
	28	农村人均用电( kW · h / 人 )	31.87	36.33	33.71	38.62
	29	农机总动力/ MW	981.5	1034.9	1399.5	1641.4

续表 1

		序号	指标	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
可持续 利用能力	经济	30	经济密度(GDP)/(万元·km <sup>-2</sup> )	58.7	72.24	86.03	100.77
		31	社会固定资产投资占 GDP 比重/%	52.39	49.72	48.33	39.84
		32	第三产业占 GDP 比重/%	31.28	29.57	30.32	29.92
		33	环保资金投资占 GDP 比率/%	0.77	0.98	1.23	1.41
		34	农民人均纯收入/(元·a <sup>-1</sup> )	1460	1665	1876	2137
动态 变化	生态 变化	35	人口自然增长率/‰	11.2	8.17	9.74	8.88
		36	水土流失面积占全区土地面积比率/%	64.5	62.7	61.1	60.21
		37	生态环境用水量/亿 m <sup>3</sup>	0.03	0.03	0.08	0.07
		38	石山半石山占全区土地面积比率/%	5.63	5.71	5.77	5.82
		39	水资源利用率/%	9.45	9.7	10.68	15.1
	环境 污染	40	人均综合用水量(m <sup>3</sup> /人)	128	135	143.5	153
		41	农业灌溉用水量/亿 m <sup>3</sup>	3.65	3.52	3.15	3.76
		42	农灌用水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	4635	7980	7755	8580
		43	年均降水 pH 平均值	6.75	6.78	7	6.89
		44	区域环境噪声平均值/dB	56.4	54.95	53.35	50.2
		45	月平均降尘量/(t·km <sup>-2</sup> )	9.49	7.02	7.8	7.09
		46	工业固体废弃物排放量/t	366.65	358.44	233.98	304.67
		47	可吸入颗粒物浓度年日均值/(mg·m <sup>-3</sup> )	0.045	0.065	0.067	0.07
		48	生活污水排放占污水排放总量比率/%	78	72	74	85.47
		49	农田化肥平均使用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	460.4	484.31	497.62	516.84

数据来源: 贵州统计年鉴、贵州年鉴、毕节地区年鉴、贵州省水资源公报、毕节地区国民经济和社会发展统计公报、贵州省土地利用总体规划资料和毕节地区环境质量报告书

1.2.2 指标选择及处理方法 因子分析法是一种揭示大样本、多变量数据中各个变量之间内在关系的一种方法,在尽可能保存原有资料信息的前提下,用较少的维数去表示原来的数据结构,简化数据。采用因子分析法(Factor Analysis)对提出评价喀斯特生态系统健康的初级指标体系定量分析,筛选、合并那些带有重复信息的指标,最终形成一套比较全面的、相互独立、代表性强的指标体系。过程如下:

(1)初步选择以下指标并输入 2003– 2006 年各相关指标样本的数据(表 1)。

(2)将指标数据标准化: 由于各指标量纲不同,在分析之前,先对数据进行无量纲标准化处理。

<sup>1</sup> 对于正向指标:

$$Y=\frac{X-X_{\min }}{X_{\max }-X_{\min }}$$

(1)

④对于负向指标:

$$Y=1-\frac{X-X_{\min }}{X_{\max }-X_{\min }}$$

(2)

式中:  $X_{\max}$  ——该项指标最大值;  $X_{\min}$  ——该项指标的最小值。

(3)确定公因子个数: 用 SPSS 软件, 求出各个因子的方差贡献率和累计贡献率, 累计贡献率  $\geq 85\%$  的因子保留为公因子, 毕节地区各初级指标的公因子有 3 个(表 2)。

表 2 总方差分解表

因子 序号	相关系数矩阵的特征值		
	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	30.002	65.221	65.221
2	9.180	19.958	85.178
3	6.818	14.822	100.000

(4)得到最终指标体系: 由于各因子的典型代表变量(除个别变量外)并不突出, 不能对因子做出很好的解释和命名。所以用 SPSS 软件对因子载荷矩阵施行方差最大正交旋转, 将其带有重复信息的指标剔除, 得到最终的指标体系(见表 3)。

(5)权重的确定: 方法有主观赋权法(专家评判法、层次分析法等)和客观赋权法(变异系数法、相关系数法、熵值法和坎蒂雷赋权法等)。其中熵值赋权法是根据某指标在各被评价对象之间的差异大小即分辨能力大小来确定权重大小的, 比其他方法优越, 本文将用此方法赋权<sup>[22]</sup>。第  $j$  项指标的熵值  $e_j$ :

$$e_j=-k\sum_{i=1}^m y_{ij}\ln y_{ij}$$

(3)

式中:  $k>0$ ,  $y_{ij}$  ——标准化之后的指标数据,  $k=1/\ln m$ ,  $0\leq y_{ij}\leq 1$ , 如果  $y_{ij}$  为 0, 则用 0.000 01 代替计算。

第  $j$  项指标的权重:

$$w_j=\frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j}$$

(4)

式中,  $d_j=1-e_j$  为指标  $x_j$  的差异系数。

1.3 评价标准

目前学术界尚没有统一认可的喀斯特生态系统健康标准。本文将喀斯特生态系统健康评价标准分 5 个等级,即病态、不健康、亚健康、健康、很健康(表 3)。各个等级相应指标标准是依据依据国家环保总局制定的生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)、国家制定和颁布的有关环境标准、行业标准与

设计标准,以及国内外公认的健康城市、生态城市标准,以及国内的园林城市、环保模范城市的建议值作为很健康的标准值<sup>[23-26]</sup>,以全国最低值为病态的限定值,在前者基础上向下浮动 20% 作为健康和亚健康的标准值,在后者基础上向上浮动 20% 作为不健康和亚健康的标准值,前后两次确定的亚健康标准值相互调整得到最终值<sup>[27]</sup>(如表 3)。

表 3 喀斯特生态系统健康评价指标体系及分级标准

序号	指标	分级标准					依 据
		病态	不健康	亚健康	健康	很健康	
结 构 功 能	01 草地面积比率/%	< 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	> 20	山区调查参考值
	02 耕地面积比率/%	< 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	> 20	
	03 水域面积比率/%	< 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	> 20	
	04 年日照时间/h	< 700	700~ 1100	1100~ 1500	1500~ 1900	> 1900	自然保护区平均值
	05 自然保护区覆盖率/%	< 8	8~ 12	12~ 15	15~ 20	> 20	
	06 森林覆盖率/%	< 8	8~ 26	26~ 44	44~ 65	> 65	生态县、生态市、生态省建设指标
	07 人均占有水资源量( m <sup>3</sup> / 人)	< 200	200~ 800	850~ 1450	1450~ 2050	> 2050	
	08 人口密度/( 人· km <sup>- 2</sup> )	> 10000	5000~ 10000	1000~ 5000	600~ 1000	< 600	自然保护区人口密度外推
	09 粮食单产/( kg· m <sup>- 2</sup> )	< 0. 3	0. 3~ 0. 675	0. 675~ 1. 049	1. 049~ 1. 424	> 1. 424	
	10 城镇化率/%	> 60	50~ 60	40~ 50	30~ 40	< 30	生态县、生态市、生态省建设指标
可 持 续 经 济 利 用 能 力	11 经济密度(GDP)(万元· km <sup>- 2</sup> )	< 400	400~ 900	900~ 1400	1400~ 1900	> 1900	国家经济发达城市平均值
	12 第三产业占 GDP 比重/%	< 15	15~ 25	25~ 35	35~ 45	> 45	生态县、生态市、生态省建设指标
	13 环保资金投资占 GDP 比率/%	< 0. 5	0. 5~ 1. 5	1. 5~ 2. 5	2. 5~ 3. 5	> 3. 5	
环 境 能 力	14 工业固废综合利用率/%	< 30	30~ 40	40~ 50	50~ 60	60~ 100	十一五规划及国家最高要求
	15 工业废水排放达标率/%	< 30	30~ 40	40~ 50	50~ 60	60~ 100	
	16 工业废气处理率/%	< 30	30~ 40	40~ 50	50~ 60	60~ 100	
生 态 变 化	17 水土流失面积占全区土地面积比率/%	< 40	30~ 40	20~ 30	10~ 20	0~ 10	国家实际情况
	18 人口自然增长率/‰	> 14	11~ 14	8~ 11	5~ 8	< 5	符合国家或当地政策
	19 石山半石山占全区土地面积比率/%	> 70	50~ 70	30~ 50	20~ 30	< 20	实际情况外推
	20 农业灌溉用水指数/( m <sup>3</sup> · hm <sup>- 2</sup> )	> 1300	900~ 1300	600~ 900	300~ 600	< 300	国家农业灌溉用水最低
环 境 污 染	21 年均降水 pH 平均值	< 4. 0	4. 0~ 4. 3	4. 3~ 4. 6	4. 6~ 5	> 5. 0	生态县、生态市、生态省建设指标
	22 可吸入颗粒物浓度年均值/( mg· m <sup>- 3</sup> )	> 0. 25	0. 2~ 0. 25	0. 15~ 0. 2	0. 1~ 0. 15	< 0. 1	国家相关标准
	23 农田化肥平均使用量/( kg· hm <sup>- 2</sup> )	> 1300	950~ 1300	600~ 950	250~ 600	< 250	生态县、生态市、生态省建设指标

1.4 评价模型

喀斯特生态系统健康状况的健康与否只是一个相对概念,可以作为一个模糊问题来处理。模糊数学方法(Fuzzy Mathematics)的基本思想是应用模糊关系合成的原理,根据被评价对象本身存在的性态或隶属上的亦此亦彼性,从数量上对其所属成分都给以刻画和描述<sup>[28-29]</sup>。因此,应用模糊数学的概念和方法建立的喀斯特生态系统健康评价模型比传统的评价方法能够更符合实际情况。

本文应用模糊数学方法拟定的喀斯特生态系统健康评价模型为

$$Z = W \cdot U \tag{5}$$

式中:  $Z$ ——喀斯特生态系统健康诊断结果;  $W$ ——3 个健康评价要素(结构功能、可持续利用能力、生态系统动态变化)对总体健康程度的的权重矩阵,  $W$

$= (W_1, W_2, W_3)$ ;  $U$ ——各生态系统健康评价要素对各级健康标准的隶属度矩阵。

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \cdots & U_{1n} \\ U_{21} & U_{22} & \cdots & U_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{m1} & U_{m2} & \cdots & U_{mn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:  $U_{mn}$ ——第  $m$  个健康评价要素对第  $n$  级健康标准的隶属度矩阵,  $m = 3, n = 5$ 。

相对隶属度的计算是模糊数学方法的关键,其计算主要分正向指标和负向指标 2 种计算方法,等级健康标准值取范围的平均值。

(1)对正向指标其计算公式为

$$^1 \text{ 当 } x_i < s_{i,1} \text{ 时,} \tag{7}$$
$$r_{i,1} = 1, r_{i,2} = r_{i,3} = r_{i,4} = r_{i,5} = 0$$

④当  $s_{i,j} \leq x_i \leq s_{i,j+1}$  时

$$r_{i,j+1} = \frac{x_i - s_{i,j}}{s_{i,j+1} - s_{i,j}} \quad (8)$$

$$r_{i,j} = 1 - r_{i,j+1} (j = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

(四)当  $x_i > s_{i,5}$  时

$$r_{i,5} = 1, r_{i,2} = r_{i,3} = r_{i,4} = r_{i,1} = 0 \quad (10)$$

(2)对负向指标其计算公式为

<sup>1</sup> 当  $x_i > s_{i,1}$  时

$$r_{i,1} = 1, r_{i,2} = r_{i,3} = r_{i,4} = r_{i,5} = 0 \quad (11)$$

(4)当  $s_{i,j+1} \leq x_i \leq s_{i,j}$  时

$$r_{i,j+1} = \frac{x_i - s_{i,j}}{s_{i,j+1} - s_{i,j}} \quad (12)$$

$$r_{i,j} = 1 - r_{i,j+1} (j = 1, 2, 3, 4) \quad (13)$$

(四)当  $x_i < s_{i,5}$  时

$$r_{i,5} = 1, r_{i,2} = r_{i,3} = r_{i,4} = r_{i,1} = 0 \quad (14)$$

式中:  $r_{ij}$  ——第  $i$  个指标对第  $j$  级标准的相对隶属度;  $x_i$  ——第  $i$  个指标的现状值;  $s_{i,j}$  ——第  $i$  个指标的第  $j$  级健康标准值。当  $1 \leq i \leq 10$  时,  $r_{i,j}$  组成矩阵

表 4 2006 年桂林、毕节、昆明喀斯特生态系统健康评价各指标年现状值

指标			桂林地区	毕节地区	昆明
结 构 功 能	结构	01 草地面积比率/ %	25.42	24.61	21.60
		02 耕地面积比率/ %	14.53	13.58	19.37
		03 水域面积比率/ %	2.09	0.95	8.67
		04 年日照时间/h	1204.30	1345.24	2271.00
	活力	05 自然保护区覆盖率/ %	15.36	2.12	13.39
		06 森林覆盖率/ %	66.50	34.84	51.20
		07 人均占有水资源量( m <sup>3</sup> / 人)	8040.00	1020.00	812.00
	功能	08 人口密度/( 人· km <sup>-2</sup> )	179.54	275.88	292.78
		09 粮食单产/( kg· m <sup>-2</sup> )	0.79	0.39	0.28
		10 城镇化率/ %	34.00	17.85	58.99
可 持 续 利 用 能 力	经济	11 经济密度( GDP)/( 万元· km <sup>-2</sup> )	222.63	100.77	572.59
		12 第三产业占 GDP 比重/ %	38.70	29.92	46.50
		13 环保资金投资占 GDP 比率/ %	3.52	1.41	2.85
	环境	14 工业固废综合利用率/ %	93.03	36.11	37.84
		15 工业废水排放达标率/ %	97.13	38.20	89.20
		16 工业废气处理率/ %	95.19	90.08	90.90
	生态 变化	17 水土流失面积占全区土地面积比率/ %	41.40	60.21	34.00
		18 人口自然增长率/ ‰	6.88	8.45	6.47
		19 石山半石山占全区土地面积比率( %)	39.20	5.82	15.20
	环境 污染	20 农业灌溉用水指数( 农业灌溉用水量/ 耕地面积)/( m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )	1233.00	1032.67	2112.44
动 态 变 化	环境 污染	21 年均降水 pH 平均值	5.24	6.89	6.24
		22 可吸入颗粒物浓度年日均值/( mg· m <sup>-3</sup> )	0.03	0.07	0.09
		23 农田化肥平均使用量/( kg· hm <sup>-2</sup> )	723.98	516.84	647.28

资料来源: 2007 年桂林、毕节、昆明统计年鉴, 2006 年三地区的水资源公报、2006 年三地区环境质量公报

2.2 健康状态的确定

将 2006 年毕节地区各指标的现状值(表 4)代

$U_{1j}$ ; 当  $11 \leq i \leq 16$  时,  $r_{i,j}$  组成矩阵  $U_{2j}$ ; 当  $17 \leq i \leq 23$  时,  $r_{i,j}$  组成矩阵  $U_{3j}$ 。

2 实例研究

“中国南方喀斯特”面积占整个中国喀斯特面积的 55%, 并主要分布在以贵州高原为中心的贵州、云南、广西等省市区。本文主要评价喀斯特生态系统是否健康, 所以选择昆明、桂林等喀斯特地貌发育典型的地区作为毕节地区的横向评价地区, 具有可比性。

2.1 权重系数的确定

根据式(1)–(4), 将 2006 年桂林、毕节、昆明 3 个地区的原始数据(表 4)进行标准化, 并求得 23 个指标的信息熵, 最后进行熵权计算, 得出喀斯特生态系统健康评价指标权重并归一化, 得到各指标对相应要素的最后权重  $W_j$ (表 5)。

入评价模型式(5), 再根据相对隶属度的计算公式(7)–(14), 得到各要素隶属度矩阵为

$$U_{ij} = \begin{bmatrix} 0.2358 & 0.0894 & 0.3449 & 0.1347 & 0.1952 \\ 0.1463 & 0.3994 & 0.2971 & 0.0000 & 0.1572 \\ 0.1064 & 0.1920 & 0.1442 & 0.3087 & 0.2487 \end{bmatrix}$$

通过各要素隶属度矩阵, 按照隶属度最大原则, 得出结论: 毕节地区喀斯特生态系统健康结构功能方面属于亚健康, 可持续利用能力方面属于不健康状态, 动态变化方面属于健康状态(图 1)。

表 5 喀斯特生态系统健康各评价指标对相应要素的权重

结构功能		可持续利用能力		动态变化	
指标 序号	信息熵	指标 序号	信息熵	指标 序号	信息熵
01	0.10780	11	0.14627	17	0.14772
02	0.09485	12	0.14880	18	0.15701
03	0.09659	13	0.16374	19	0.14787
04	0.09837	14	0.19385	20	0.15990
05	0.11380	15	0.19013	21	0.13649
06	0.08965	16	0.15721	22	0.12557
07	0.11794			23	0.12544
08	0.09642				
09	0.09038				
10	0.09419				

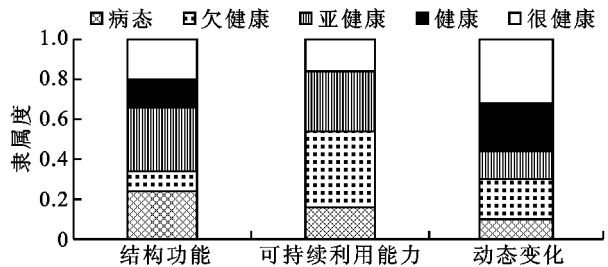


图 1 2006 年毕节地区喀斯特生态系统健康各要素评价结果

为对毕节地区喀斯特生态系统健康整体状况进行评价, 采用熵权法对每个评价要素取权重, 权矩阵为:  $W = (0.43564, 0.26401, 0.30035)$ , 带入公式(5), 然后得出毕节地区喀斯特生态系统健康状态的隶属度: 很健康为 0.201 3、健康为 0.151 4、亚健康为 0.272 0、不健康为 0.202 0、病态为 0.173 3。

2.3 比较评价

为分析毕节喀斯特生态系统与其它地区喀斯特生态系统区别, 选取桂林地区、昆明作为参比地区对 3 个喀斯特地区的生态系统健康状况进行横向评价。将 2006 年桂林地区、昆明各指标的现状值(表 4)代入评价模型, 得出隶属度矩阵分别为:

$$U_{gl} = \begin{bmatrix} 0.0966 & 0.0404 & 0.2656 & 0.3208 & 0.2767 \\ 0.1389 & 0.0074 & 0.0193 & 0.1295 & 0.7049 \\ 0.1441 & 0.1636 & 0.2670 & 0.2840 & 0.1413 \end{bmatrix}$$
  
$$U_{km} = \begin{bmatrix} 0.0712 & 0.2523 & 0.2065 & 0.2607 & 0.2094 \\ 0.0252 & 0.2600 & 0.0795 & 0.2582 & 0.3771 \\ 0.1599 & 0.1329 & 0.0944 & 0.4102 & 0.2026 \end{bmatrix}$$

利用权矩阵进行综合评价, 得出两个城市生态系统健康状态的隶属度, 桂林地区: 很健康为 0.349 1、健康为 0.259 2、亚健康为 0.201 0、不健康为 0.068 7、病态为 0.122 0; 昆明: 很健康为 0.251 6、健康为 0.304 9、亚健康为 0.139 3、不健康为 0.218 5、病态为 0.085 7(图 2)。

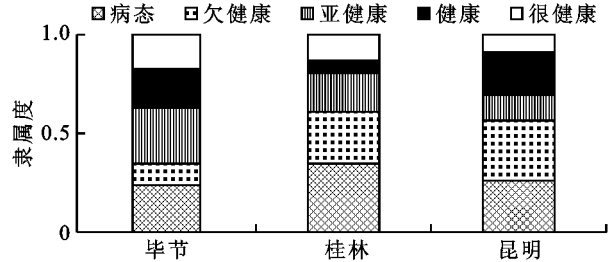


图 2 2006 年毕节地区、桂林、昆明喀斯特生态系统模糊数学综合健康评价结果对比

模糊综合结果分析最常用的方法是最大隶属度法, 但其存在一定的局限性, 当评判对象对不同等级的隶属度相差不大时, 可能会得到不合理的评价结果。在此采用加权平均原则求隶属等级的方法对模糊综合评价结果向量进行分析, 以避免用最大隶属度原则所带来的局限性<sup>[30]</sup>。

$$B^* = \frac{\sum_{j=1}^5 U_j^k \cdot j}{\sum_{j=1}^5 U_j^k} \quad (15)$$

式中:  $B^*$  ——隶属度;  $j$  ——健康等级,  $k=2$ , 目的是控制较大的  $U_j$  所起的作用。

根据式(15), 求得毕节地区、桂林、昆明 3 个城市的隶属度依次为:  $B^* = (3.0620, 4.1098, 3.6811)$ , 按照加权平均原则,  $B^* < 1.5$  为病态,  $1.5 \leq B^* < 2.5$  为不健康,  $2.5 \leq B^* < 3.5$  为亚健康,  $3.5 \leq B^* < 4.5$  为健康,  $B^* \geq 4.5$  为很健康, 得出结果: 桂林、昆明均处于健康状态, 毕节地区处于亚健康状态。3 个地区喀斯特生态系统整体健康状况排序为: 桂林 > 昆明 > 毕节地区。

3 结论

采用模糊综合评价法对喀斯特生态系统进行评价得出的健康状况排序比较符合每个地区的实际情况。评价结果为: 桂林 > 昆明 > 毕节地区, 究其原因 是昆明的人口密度、城镇化程度比桂林高, 在一定程度上对喀斯特的自然生态系统造成了一定的压力, 导致了人均占有水资源量较低, 由于粮食单产较低加剧了人与环境之间的矛盾。同时拥有较高的城镇化程度的同时对环境保护的重视程度又不够, 在自然保护区覆盖率、森林覆盖率、可吸入颗粒物、环保

资金投资占 GDP 比率和三废处理率相对于桂林都较低。毕节地区排在最后,主要是由于毕节地区经济发展水平较低,所以发展成为当前的首要任务,而对于发展所带来的各种环境问题(如工业发展产生的各种固体废物、废水对环境的影响)的关注程度就比较低,政府对于环保的投入远远低于贵州省的平均水平;其次为毕节地区人口自然增长率较高,虽然人口密度较低,但是由于毕节喀斯特地区水土流失严重,石漠化程度较高,适合人类生存的地区有限,如果不加重视人居环境就会进一步恶化。

#### 参考文献:

- [1] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health[M]//Costanza R B, Norton G, Haskell B D. Ecosystem health: new goals for environmental management. Washinton D C: Island Press, 1992: 239-256.
- [2] Rapport D J. Evaluating landscape health: integrating societal goals and biophysical process[J]. Journal of Environmental Management, 1998, 53: 4-15.
- [3] Rapport D J. Gaining respectability: development of quantitative methods in ecosystem health[J]. Ecosystem Health, 1999, 5: 1-2.
- [4] Mageau M T, Costanza R, Ulanowicz R E. The development and initial testing of a quantitative assessment of ecosystem health[J]. Ecosystem Health, 1995, 1(4): 201-213.
- [5] Ulanowicz R E. Growth and development, ecosystem Phenomenology[M]. New York: Springer, 1986.
- [6] Kay J J, Schneider E D. Thermodynamics and measurements of ecosystem integrity[C]//Mckenzie D. Ecological Indicators. Amsterdam: Elsevier, 1991: 159-182.
- [7] Karr J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality[J]. Enviromental Toxicology and Chemistry, 1993, 12: 1521-1531.
- [8] Rapport D J, Regier H A, Hutchinson T C. Ecosystem behavior under stress[J]. The American Naturalist, 1985, 125: 617-640.
- [9] 任海, 邬建国, 彭少麟. 生态系统健康的评估[J]. 热带地理, 2000, 20(4): 310-316.
- [10] 袁兴中, 陆健健, 刘红. 生态系统健康评价: 概念构架与指标选择[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 627-629.
- [11] 洪伟, 阎淑君, 吴承祯. 福建森林生态系统安全和生态响应[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2003, 32(1): 79-83.
- [12] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展[J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 31-36.
- [13] 王小艺, 沈佐锐. 农业生态系统健康评估方法研究概况[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(1): 84-90.
- [14] 郝敦元, 高霞, 刘钟龄, 等. 内蒙古草原生态系统健康评价的植物群落组织力测定[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1672-1678.
- [15] 刘永, 郭怀成, 戴永立. 湖泊生态系统健康评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 723-739.
- [16] 胡廷兰, 杨志峰, 何孟常, 等. 一种城市生态系统健康评价方法及其应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 270-273.
- [17] 吴刚, 韩青海, 蓝盛芳. 生态系统健康学与生态系统健康评价[J]. 土壤与环境, 1999, 8(1): 78-80.
- [18] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平. 生态系统健康与人类可持续发展[J]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 751-756.
- [19] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [20] Jerry M S, Mariano B, Annalee Y, et al. Developing Ecosystem Health Indicators in Centro Habana: A Community-based Approach[J]. Ecosystem Health, 2001, 7(1): 15-26.
- [21] 章文波, 陈红艳. 实用数据统计分析及 SPSS12.0 应用[M]. 北京: 人民邮电出版社出版, 2006.
- [22] 秦耀辰. 区域系统模型及其应用[M]. 开封: 河南大学出版社, 1994: 118-119.
- [23] 鲁敏, 李英杰. 生态城市理论框架及特征标准[J]. 山东省青年管理干部学院学报, 2005(1): 117-118.
- [24] 宋永昌, 戚仁海, 由文辉, 等. 生态城市的指标体系与评价方法[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(5): 16-19.
- [25] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强, 等. 生态城市建设及其指标体系[J]. 城市发展研究, 2001(6): 54-58.
- [26] 李冬林, 王宝松, 阮宏华, 等. 河南小秦岭自然保护区生态评价[J]. 安徽农业大学学报, 2007, 34(1): 97-102.
- [27] 曾勇, 沈根祥, 黄沈发, 等. 上海城市生态系统健康评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(2): 208-212.
- [28] 周生路, 朱凤武, 蒋旭东. 模糊综合评判方法在农用地定级中的应用: 以柳州市郊区耕地定级为例[J]. 经济地理, 2001(增刊): 222-225.
- [29] 冯宝成. 模糊数学实用集粹[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [30] 官冬杰, 苏维词, 周继霞. 重庆都市圈生态系统健康评价研究[J]. 地域研究与开发, 2007, 26(4): 102-106.
- [31] 官冬杰, 苏维词. 城市生态系统健康评价方法及其应用研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1716-1722.